

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

(19) DEUTSCHE DEMOKRATISCHE REPUBLIK



Wirtschaftspatent

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1 Patentgesetz

# PATENTSCHRIFT

ISSN 0433 6461

(11)

208 324

Int.Cl.<sup>3</sup>

3(51) B 60 L 15/20

AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) WP B 60 L/ 2417 234

(22) 16.07.82

(44) 02.05.84

(71) siehe (72)

(72) GROSSE, SEBASTIAN, DIPL.-ING.; HORN, PETER, DR.-ING.; DIPL.-ING.; WINKLER, AXEL, DIPL.-ING.; DD.

(54) VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG ENERGIEOPTIMALER FAHRREGIME FÜR SCHIENENFAHRZEUGE DES STADT- UND VORORTVERKEHRS

(57) Das „Verfahren zur Ermittlung energieoptimaler Fahrregime für Schienenfahrzeuge des Stadt- und Vorortverkehrs“ bezieht sich auf die Einsparung von Traktionsenergie im vorzugsweise elektrischen Zugbetrieb sowie auf teilautomatisierte Steuerungen von Schienenfahrzeugen. Das Ziel der Erfindung ist eine technisch und ökonomisch effektive Form der energiesparenden Zugsteuerung, deren Realisierungsaufwand ohne Verminderung von Genauigkeit und Empfindlichkeit minimal ist. Die Grundlage hierfür bildet erfindungsgemäß ein neuartiges Berechnungsverfahren, das auf gegebene algorithmische und gerätetechnische Möglichkeiten der Mikrorechentechnik aufbaut. Dabei werden durch Nutzen von im Rahmen vorausgegangener Simulations- und Optimierungsrechnungen ermittelten funktionalen Zusammenhängen zwischen den Umschaltpunkten der einzelnen Fahrregimephasen und der Fahrzeit für jede einer aktuellen Fahrplanlage zuzuordnende Fahrzeitvorgabe optimale Fahrstrategien synthetisiert. Als Anwendungsgebiet der Erfindung kommen vor allem der schienengebundene elektrisch betriebene Stadt-, Vorort- und Personenzugverkehr sowie durch ähnliche Betriebsverhältnisse charakterisierte Verkehrssysteme in Frage.

Titel der Erfindung

Verfahren zur Ermittlung energieoptimaler Fahrregime für Schienenfahrzeuge des Stadt- und Vorortverkehrs

5

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur vereinfachten Echtzeitsynthese von optimalen Fahrregimen für eine energiesparende Steuerung von Zügen des Stadt- und Vorortverkehrs durch die Berechnung der die optimalen Fahrregimephasen Anfahrt, Beharrungsfahrt, Auslauf und Bremsen definierenden, d. h. begrenzenden geschwindigkeits- und wegabhängigen Umschalt-  
10 punkte Abschaltgeschwindigkeit  $v_{AB}$ , Abschaltweg  $s_{AB}$  und  
15 Bremseinsatzpunkt  $s_B$  unter Ausnutzen fahrdynamischer Funktionen, die den Zusammenhang zwischen der Fahrzeit  $t_F$  und diesen Umschaltpunkten ausreichend beschreiben.

Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

20

Bekannt ist gemäß dem WP 129 761 ein Verfahren, das die Vor-  
ausberechnung geschwindigkeits- und wegabhängiger Umschaltun-  
gen zwischen den einzelnen Fahrregimen einer Zugfahrt für die  
Fahrzeitvorgaben des Regelbetriebes sowie für ausgewählte wei-  
25 tere Fahrzeitvarianten entsprechend zu erwartenden oder mög-  
lich erscheinenden Fahrplanabweichungen beinhaltet und diese  
in einer auf dem Triebfahrzeug zu installierenden Speicher-  
und Steuereinheit vorprogrammiert speichert. Diese Umschalt-

vorgaben sind vor bzw. zum Zeitpunkt des jeweiligen Fahrtbeginns von der Steuereinrichtung bereitzustellen.

Hierbei werden ausschließlich orts- oder orts- und zeitabhängige Plansteuerungen realisiert, bei denen ein direkter Zusammenhang zwischen der Anzahl der zurückgelegten Fahrschnitte bzw. der aktuellen diskreten Prozeßdauer und der Adresse des Speicherplatzes für das aktuelle optimale Fahrregime besteht. Nachteilig bei diesem Lösungskonzept ist vor allem der auf Grund der zeitlichen Diskretisierung der Prozeßdauer und damit auch der Fahrzeit hohe Speicheraufwand, um die bei notwendigerweise kleinen zeitlichen Diskretisierungsintervallen große Anzahl von Fahrzeit- bzw. Fahrregimevarianten zu speichern und der Aufwand zur zeit- und wegabhängigen Auswahl der Steuerstrategien.

#### Ziel der Erfindung

Ziel der Erfindung ist es, den technischen und ökonomischen Aufwand für eine energiesparende Zugsteuerung zu vermindern und durch ein effektives Berechnungsverfahren die algorithmischen Voraussetzungen für ein gerätetechnisches Konzept zu schaffen, das hinsichtlich seines Raumbedarfes weitestgehend problemlos in einen Fahrzeugführerstand integriert werden kann. Darüber hinaus wird durch die angestrebte kontinuierliche Echtzeitregelung eine im strengeren Sinne der Optimalität zutreffendere, d. h. energiesparendere Steuerstrategie durch das erfindungsgemäße Verfahren bereitgestellt.

#### Darlegung des Wesens der Erfindung

Die technische Aufgabe der Erfindung besteht darin, durch Nutzen der im Rahmen vorausgegangener Simulations- und Optimierungsberechnungen ermittelten funktionalen Beziehungen zwischen den Umschaltpunkten  $v_{AB}$ ,  $s_{AB}$  sowie  $s_B$  und der Fahrzeit  $t_F$ , die in einfacher Form als Wertepaare, sogenannte Stützstellen, vorhanden sein können, optimale Fahrstrategien für jede beliebige, zwischen einer technisch minimalen und betrieblich bedingten oder zweckmäßigerweise maximalen Fahr-

zeit einzuordnende, aktuelle Fahrzeit zu synthetisieren und damit energiewirtschaftliche Zugfahrten zwischen zwei planmäßigen Haltepunkten zu ermöglichen.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe gelöst, indem die funktiona-

- 5 len Beziehungen für die Schaltpunkte  $v_{AB}$ ,  $s_{AB}$  sowie  $s_B$  und der Fahrzeit  $t_F$  auf der Basis diskreter Fahrzeiten und damit für diskrete Fahrstrategien durch eine digitale Simulation von Zugfahrten entsprechend den realen Streckenverhältnissen wie Haltepunktabstand, Weg-Neigungs- und Weg-Geschwindig-
- 10 keitsprofil und den realen Zug- bzw. Fahrzeugverhältnissen wie Fahrwiderstand, Geschwindigkeits-Zugkraftcharakteristik, Zugmasse und Bremsverzögerung auf einer stationären EDVA im voraus ermittelt werden.

- Diese funktionalen Beziehungen  $v_{AB} = f(t_F)$ ,  $s_{AB} = f(t_F)$  und
- 15  $s_B = f(t_F)$  können somit zunächst durch diskrete Stützstellen beschrieben werden.

- Für vereinfachte Bedingungen ist es damit unter Umständen zweckmäßig, die Funktionen  $v_{AB} = f(t_F)$ ,  $s_{AB} = f(t_F)$ ,  $s_B = f(t_F)$  durch eine stückweise Linearisierung darzustellen und die für
- 20 beliebige Fahrzeitvorgaben gesuchten Werte  $v_{AB}(t_F)$ ,  $s_{AB}(t_F)$  oder  $s_B(t_F)$  durch Geradengleichungen, lineare Interpolationsbeziehungen o. ä. zu ermitteln. Durch eine geeignete Anzahl von Stützstellen können die durch die Linearisierung verursachten Fehler in vertretbaren Grenzen gehalten werden.
- 25 Die auf dem Fahrzeug zu installierende Bordelektronik hat damit vor allem die Aufgaben der Speicherung der Stützstellen  $v_{AB}$ ,  $s_{AB}$  sowie  $s_B$  und  $t_F$  und der Abarbeitung der erforderlichen Rechengesetze. Die jeweilige Speicherplatzadresse für die zu dem aktuellen Streckenabschnitt zugehörigen Stütz-
- 30 stellen erfolgt durch Summieren der zurückgelegten Streckenabschnitte in einem Abschnittszähler und gleichfalls abgespeicherter Rechenvorschriften unter Nutzung des aktuellen Zählerstandes im Abschnittszähler. Die Abspeicherung der Werte  $v_{AB}$ ,  $s_{AB}$  und  $s_B$  wird durch je ein oder mehrere aus 8
- 35 bit bestehende Speicherworte realisiert. Die in Abhängigkeit von der aktuellen Fahrzeitvorgabe ermittelten optimalen Umschaltpunkte  $v_{AB}$ ,  $s_{AB}$  und  $s_B$  können sowohl über eine digitale Anzeigevorrichtung an den Triebfahrzeugführer ausgegeben werden und dieser realisiert die eigentliche Manövrierung

(open-loop-Steuerung) als auch unmittelbar an eine selbsttätige Steuereinrichtung übergeben werden (closed-loop-Steuerung), sodaß der Triebfahrzeugführer mit Hilfe der Anzeigevorrichtung im wesentlichen nur eine Kontrollfunktion ausübt. Die bemerkenswerte Charakteristik des Verfahrens auf der Grundlage der Verarbeitung von diskreten Stützstellen besteht darin, daß sowohl Abschaltgeschwindigkeiten als auch Abschaltwege durch nur eine mathematische Vorschrift und mittels eines Stützstellensatzes pro Streckenabschnitt berechnet werden können. Die Ergebnisinterpretation und damit die Art und Weise der Fahrregimeempfehlung resultiert dabei unmittelbar aus dem Monotonieverhalten der für jeden Streckenabschnitt abgespeicherten Folge von Stützstellen.

Ergeben die  $n$  Funktionswerte der Stützstellen mit dem Zählindex von  $j = 1$  bis  $j = n$  eine monoton fallende Folge im strengen Sinne, so ist jede der Stützstellen und damit das Berechnungsergebnis als eine Abschaltgeschwindigkeit zu interpretieren. Weicht der Funktionswert der Stützstelle  $j = n$  von dieser Monotonie ab, wird durch diesen eine Abschaltgeschwindigkeit repräsentiert; alle übrigen  $n-1$  Funktionswerte werden als Abschaltwege identifiziert. Liegt die verfügbare Fahrzeit im Bereich der Stützstellen  $j = n-1$  und  $j = n$ , erfolgt ein Austausch der  $j = (n-1)$ -ten (Weg) - Stützstelle mit der zulässigen strecken- oder fahrzeugabhängigen Höchstgeschwindigkeit, die aus dem Wert der  $j = n$ -ten Stützstelle über vereinbarte mathematische Beziehungen oder einfache Festlegungen ermittelt werden kann. Der Funktionswert der  $j = n$ -ten Stützstelle muß dabei stets einen größeren Betrag als der der  $j = (n-1)$ -ten Stützstelle aufweisen, um als Geschwindigkeit erkannt zu werden. Diese Voraussetzung ist bei geeigneter Zahlendarstellung mit den praktischen Gegebenheiten vereinbar.

Der Fall  $v_{AB}(j=n) \leq v_{AB}(j=n-1)$  ist für die Praxis bedenkenlos.

Ausführungsbeispiel:

Die Erfindung soll nachstehend durch Ausführungsbeispiele anhand

- a) eines reinen  $v_{AB}$  - Stützstellenspektrums (vgl. Abb. 1) und
- b) eines kombinierten  $v_{AB}$  -  $s_{AB}$  - Stützstellenspektrums (vgl. Abb. 2)

erläutert werden.

Die Abbildungen 1 und 2 sind reine Prinzipdarstellungen zur qualitativen Illustration des Verfahrens und repräsentieren keine quantitativen physikalischen Hintergrund. Sie zeigen folgende Sachverhalte:

Abb. 1: Funktionaler Zusammenhang

$$v_{AB \text{ opt}} = f(t_P)$$

Abb. 2: Funktionaler Zusammenhang

$$v_{AB \text{ opt}} = f(t_P) \text{ kombiniert mit}$$

$$s_{AB \text{ opt}} = f(t_P)$$

Abbildung 3 verdeutlicht die wesentlichen Etappen des Test- und Berechnungsverfahrens.

Für das Verfahren (vgl. Abb. 3) sind die verfügbare Fahrzeit (1) aus dem Fahrzeitwischenspeicher und die Folge der für den zu befahrenden Abschnitt abgespeicherten Stützstellen (2) aus dem Streckendatenspeicher bereitzustellen.

Beispiel 4:

Nach der in einem Dekoder (3) erfolgten Stützstellendekodierung beginnt die Abarbeitung des Verfahrens mit einem Test bezüglich des Monotonieverhaltens der Stützstellenfolge (4), dessen Ergebnis im Beispiel einen monoton fallenden Verlauf ergibt, sodass die abgespeicherten Funktionswerte aller Stützstellen als Geschwindigkeitswerte zu interpretieren und



abzuspeichern sind (5). Mittels eines Suchalgorithmus (6) wird das entsprechend der verfügbaren Fahrzeit zutreffende Stützstellenintervall ermittelt. Fahrzeiten außerhalb der mittels Stützstellen abgespeicherten Fahrzeitbereiche werden  
5 jeweils der Stützstelle  $j = 1$  bzw.  $j = n$  mit  $j = 1 (1)n$  zugeordnet.

Im Ergebnis der linearen Interpolation zwischen den das Intervall begrenzenden Stützstellen (7) erfolgen die Ergebnis-  
10 interpretation (8) sowie die Aufbereitung und Bereitstellung der optimalen Abschaltgeschwindigkeit zur Weiterverarbeitung (9).

#### Beispiel b:

15 Resultiert aus dem Monotonietest (4), daß die Monotonie der Stützstellenfolge durch die  $j = n$  - te Stützstelle gestört ist, sind die abgespeicherten Funktionswerte der Stützstellen  $j = 1$  bis  $j = n-1$  Abschaltwege; der abgespeicherte Funktionswert der Stützstelle  $j = n$  ist als eine Abschaltgeschwindigkeit zu interpretieren und ein definierter Speicherbereich  
20 gesondert zu markieren (10). Danach erfolgt die Ermittlung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (11). Im Verlaufe des Suchalgorithmus (6) zum Auffinden des relevanten Stützstellenintervalls wird gesondert ausgewertet, ob das Intervall  
25  $[n-1; n]$  zur Interpolation herangezogen wird. Ist die aktuelle Fahrzeit Element dieses durch die Stützstellen "n-1" und "n" begrenzten Intervalles, so erfolgt der Austausch des Funktionswertes der Abschaltwegstützstelle n-1 gegen den Wert der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, der die  
30 jeweiligen Wertevorräte für die Abschaltgeschwindigkeit und den Abschaltweg begrenzt.

Entsprechend trägt die optimale Fahrempfehlung Geschwindigkeitscharakter; hingegen beinhaltet sie bei Interpolation im Bereich der übrigen Stützstellen einen Abschaltweg.

35

Hierzu 3 Abbildungen

Erfindungsanspruch

1. Verfahren zur energieoptimalen Steuerung von Schienenfahrzeugen, gekennzeichnet dadurch, daß die energieoptimale Fahrstrategie, die in Form der Vorgaben für die Fahrregimeumschaltungen zwischen den Phasen Anfahrt und Auslauf, Beharrungsfahrt und Auslauf sowie Auslauf und Bremsen ermittelt wird, das Ergebnis einer vereinfachten Echtzeitsynthese an Bord des Triebfahrzeuges ist, wobei als mathematisch-physikalische Grundlage abgespeicherte fahrdynamische Gesetzmäßigkeiten zur energiewirtschaftlichen Fahrweise, repräsentiert durch funktionale Zusammenhänge zwischen der Abschaltgeschwindigkeit  $v_{AB}$ , dem Abschaltweg  $s_{AB}$  sowie dem Bremseninsatzpunkt  $s_B$  und der aktuellen Fahrzeitvorgabe  $t_F$  für den zu befahrenden Streckenabschnitt fungieren und auf der Basis dieser Funktionale für jede beliebige Fahrzeitvorgabe die jeweils optimalen Umschaltunkte Abschaltgeschwindigkeit, Abschaltweg und Bremsweg und damit die optimale Fahrstrategie synthetisiert werden.

2. Verfahren nach Punkt 1., gekennzeichnet dadurch, daß die die energieoptimale Fahrweise charakterisierenden funktionalen Zusammenhänge

$$v_{AB} = f(t_F) \text{ und}$$

$$s_{AB} = f(t_F)$$

$$s_B = f(t_F)$$

im voraus auf einer stationären EDVA durch Simulations- und Optimierungsrechnungen ermittelt werden. Dabei finden die zu vereinbarenden Zugparameter wie Masse, Fahrwiderstände, Zugkraft- und Geschwindigkeitsdiagramm sowie für jeden Streckenabschnitt die Streckenparameter als wegabhängiges Neigungs- und Geschwindigkeitsfeld Berücksichtigung.

3. Verfahren nach Punkt 1. und 2., gekennzeichnet dadurch, daß die unter Punkt 2. genannten funktionalen Zusammen-

hänge stückweise linearisiert werden, so daß sich die Speicherung der Funktionsverläufe auf eine endliche Anzahl von Wertepaaren (Stützstellen) der Form

$$v_{AB \text{ opt}}(k) = f(v_{AB}(k,i), t_F(k,i))$$

$$s_{AB \text{ opt}}(k) = f(s_{AB}(k,i), t_F(k,i))$$

$$s_B \text{ opt}(k) = f(s_B(k,i), t_F(k,i))$$

mit  $i = 1(1)n$

beschränkt, wobei der Index  $k$  den aktuellen Streckenabschnitt symbolisiert.

4. Verfahren nach Punkt 1. bis 3., gekennzeichnet dadurch, daß die Abspeicherung der Stützstellen kombiniert und komprimiert innerhalb eines oder mehrerer 8-bit-Speicherworte erfolgt, so daß der eigentlichen Optimierungsrechnung die Darstellung von  $v_{AB}$ ,  $s_{AB}$  sowie  $s_B$  und  $t_F$  als separate 1- oder 2-Byte-Worte mittels einer Datendecodierung vorausgeht.

5. Verfahren nach Punkt 1. bis 4., gekennzeichnet dadurch, daß eine vereinfachte aber hinsichtlich der Energieeinsparung und Pünktlichkeit ausreichend effektive Steuerstrategie auf die Optimierung des Bremseinsatzpunktes verzichtet und sich lediglich auf die Berechnung und Realisierung der optimalen Umschaltpunkte Abschaltgeschwindigkeit  $v_{AB}$  und Abschaltweg  $s_{AB}$  und auf die Realisierung der damit verbundenen Fahrregimephasen stützt.

6. Verfahren nach Punkt 1. bis 5., gekennzeichnet dadurch, daß zur Berechnung von Abschaltgeschwindigkeiten, Abschaltwegen oder der Kombination beider nur ein Stützstellensatz mit einheitlich  $n$  Elementen und mit einheitlichen Datenformaten existent ist.

7. Verfahren nach Punkt 1. bis 4., gekennzeichnet dadurch, daß die optimale Fahrstrategie und die die einzelnen Fahrregime begrenzenden optimalen Umschaltunkte auf der Basis von maximal  $n = 4$  Stützstellen hinsichtlich der Energieeinsparung und Pünktlichkeit sowie der praktischen Realisierbarkeit ausreichend genau approximiert werden.
8. Verfahren nach Punkt 1. bis 7., gekennzeichnet dadurch, daß das Monotonieverhalten der abgespeicherten Funktionswerte entscheidet, ob die ermittelten Funktionswerte der Steuerstrategie als Abschaltgeschwindigkeit oder als Abschaltgeschwindigkeit und Abschaltweg zu interpretieren sind.
9. Verfahren nach Punkt 1. bis 8., insbesondere nach Punkt 8., gekennzeichnet dadurch, daß in Abhängigkeit von der verfügbaren Fahrzeit entweder eine Abschaltgeschwindigkeit ( $v_{AB}$ ) oder ein Abschaltweg ( $s_{AB}$ ) bei gleichzeitiger Ermittlung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit berechnet wird.
10. Verfahren nach Punkt 1. bis 9., gekennzeichnet dadurch, daß die das entsprechend der aktuellen Fahrzeitvorgabe relevante Interpolationsintervall begrenzenden Stützstellen durch einen Suchalgorithmus mit  $n-1$  oder im Interesse einer vordringlich minimalen Rechenzeit mit  $n-2$  Suchschritten ermittelt werden.
11. Verfahren nach Punkt 1. bis 10., gekennzeichnet dadurch, daß, wenn Fahrzeitvorgaben durch übergeordnete Optimierungsvorschriften oder durch besonderen betrieblichen Situationen außerhalb des für die Fahrzeitoptimierung zugelassenen und durch die Stützstellen  $i = 1$  und  $j = n$  begrenzten Optimierungsbereiches liegen, durch Grenzwerttests und Vergleiche die den Funktionswerten der Stützstellen  $j = 1$  bzw.  $j = n$  zugeordneten Fahrstrategien als optimale und zugleich praktikable Fahrregimeempfehlung ermittelt werden.

12. Verfahren nach Punkt 1. bis 11., gekennzeichnet dadurch,  
daß die Ermittlung der Funktionswerte  $v_{AB}$  und  $s_{AB}$  gemäß  
einer linearen Interpolationsvorschrift erfolgt und damit  
der arithmetische Aufwand der Syntheselösung an Bord des  
Triebfahrzeuges auf die Lösung der Zweipunktgleichung  
minimiert wird.
13. Verfahren nach Punkt 1. bis 12., gekennzeichnet dadurch,  
daß eine alphanumerische Anzeige, gekoppelt mit einer  
akustischen Signaleinrichtung, die Umschaltpunkte zwi-  
schen den Phasen des Fahrregimes zur Information für den  
Triebfahrzeugführer bereitstellt.
14. Verfahren nach Punkt 1. bis 13., gekennzeichnet dadurch,  
daß bei Erreichen des Umschaltpunktes in das Fahrregime  
"Auslauf" eine automatische Abschaltung der Antriebsein-  
richtung erfolgt.
15. Verfahren nach Punkt 1. bis 14., gekennzeichnet dadurch,  
daß der Bremseninsatzpunkt unter Berücksichtigung  
· der aktuellen Geschwindigkeit  
· der vom Fahrzeug realisierbaren Bremsverzögerung sowie  
· des bis zum Zielpunkt verfügbaren Fahrweges  
ermittelt und damit der Zusammenhang  $s_B = f(t_P)$  durch  
eine Rechenvorschrift höherer Priorität überlagert wird.

Hierzu 3 Seiten Zeichnungen

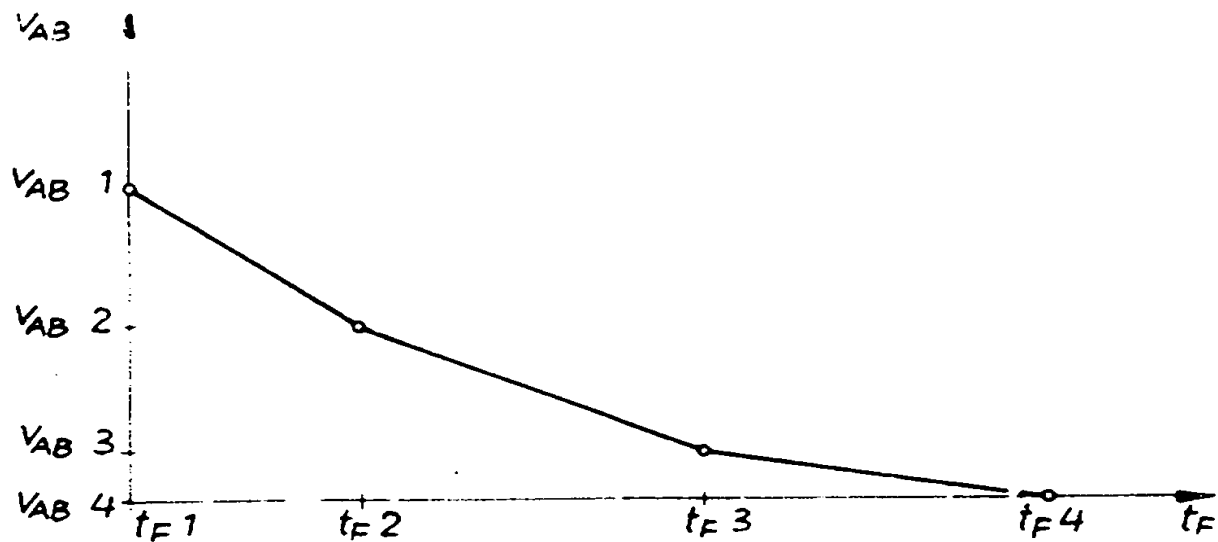


Abb. 1

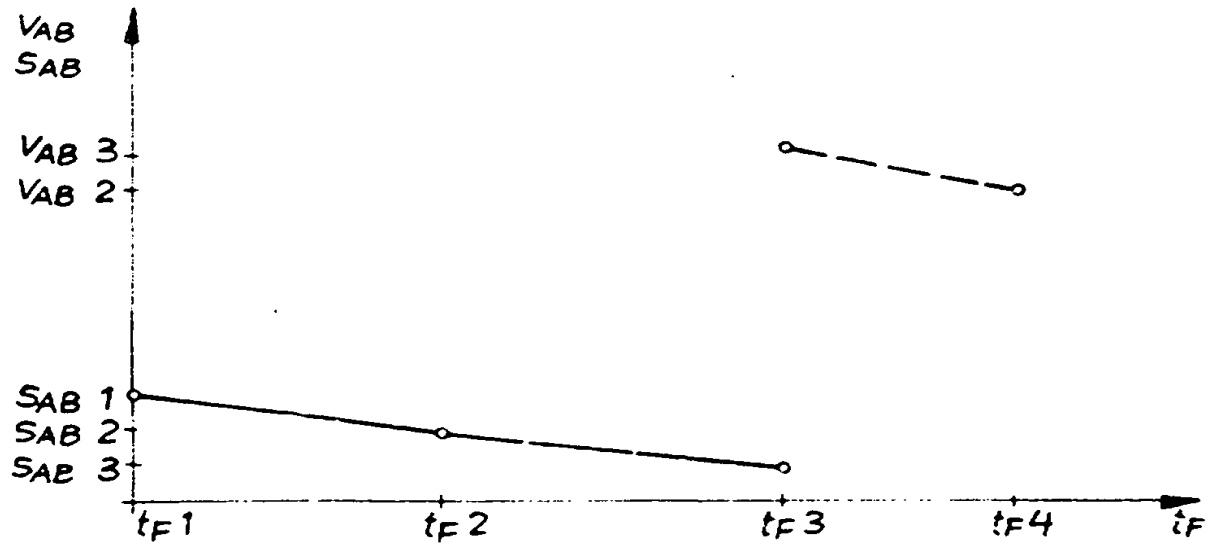
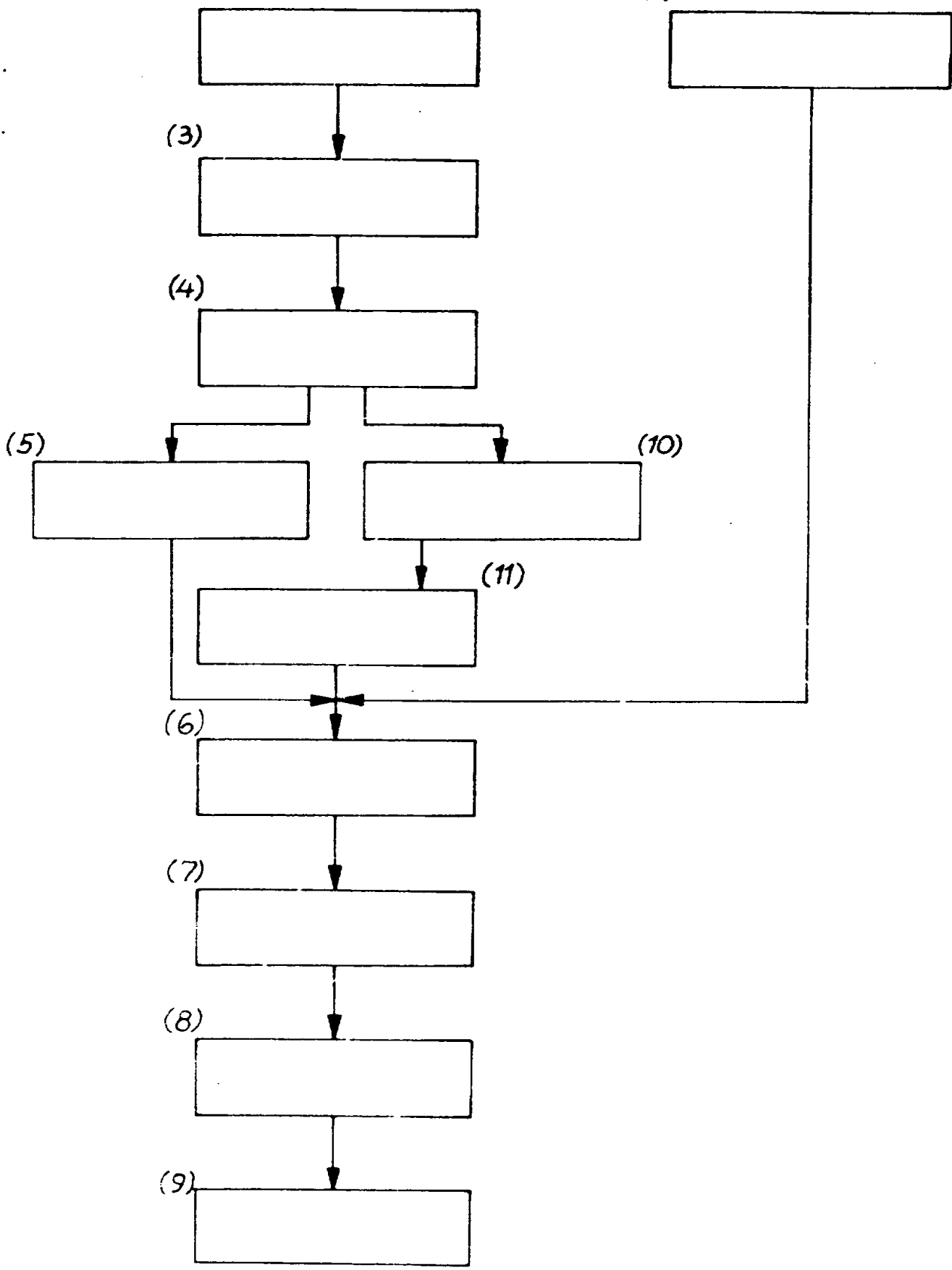


Abb. 2

241 / 23 4  
(1)



405 3

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**